

光放射圧による微小物体の精密制御に関する研究

著者	日暮 栄治
号	1896
発行年	1999
URL	http://hdl.handle.net/10097/10703

氏 名	ひぐらし えいじ
授 与 学 位	日暮 栄治 博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成11年10月13日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	平成3年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	光放射圧による微小物体の精密制御に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 清野 慧 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 伊藤 弘昌

論 文 内 容 要 旨

光マニピュレーション技術は、非接触で微粒子を保持する光ピンセットとして生物学や医学、化学などの様々な分野で利用されている。さらには、エネルギー自給装置を組み込めないマイクロマシンの分野や微小領域でのマイクロ部品のアセンブリ、アライメントが必要なマイクロオプティクス分野でもその応用が期待されている。このため、光マニピュレーション技術をより操作性、制御性の高い技術に発展させることが重要になってきている。本論文では、高機能光マニピュレーション技術の開発を目指し、1)形状や屈折率を制御した微小物体をマイクロマシニング技術により作製し、操作できる物体を多様にした、2)これら微小物体を用いて、回転やアライメントなどの新しい光マニピュレーション技術を提案した、3)光トラップ粒子の新しい計測手法を提案し、提案手法を小型センサとして実現するためにマイクロマシニング技術による作製を試みた。すなわち、本論文は光放射圧による微小物体の精密制御の研究についてまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は序論である。本論文の背景、目的および構成について述べた。

第2章では、光放射圧の理論について概説するとともに、光放射圧を制御する方法として、物体の形状を制御する方法を提案した。寸法が波長に比べて大きい物体に適用できる光線光学モデルを用いて、放射圧、光トラップ力の解析を行った。まず、屈折率の異なる界面、球形微粒子に作用する放射圧を解析し、放射圧の基本的な振る舞いについて明らかにした。さらに物体の形状をリング状に制御することにより、ガウシアンビームを用いても低屈折率物体（比屈折率 <1 ）の光トラッピングが可能になり操作適用領域を拡大できることを示した。

第3章では、光マニピュレーション技術の操作性を向上させるという観点から物体形状に着目した光放射圧による回転駆動制御について述べた。マイクロマシニング技術を用いた二酸化シリコン、フッ素化ポリイミド人工微小物体の作製法を提案した。特に微小物体材料にフッ素化ポリイミドを選択し、レジストマスクのパターニングに電子ビーム露光を用いることにより、寸法が $10\ \mu\text{m}$ 程度の微細形状微小物体を実現した。この微小物体を用いて、第2章で提案した低屈折率リング物体の光トラップを実験で検証した。さらに、断面形状を回転対称であり、鏡面对称性をもたない形（鏡像体を持つ形）に加工することにより（図1(a)）、光が物体から出射するときに作用する放射圧の一部をトルクに変換した（図1(b)）。光トラップした微小物体の回転軸が1)光軸と一致、2)光軸と直交する回転駆動を実現した。本章では放射圧による微小構造物の組立、自動光軸アライメント、そして駆動源としての応用の可能性を示した。

第4章では光の角運動量によるトラップした微小物体の角度位置決めについて述べた。高複屈折率物体がマイクロオーダーの寸法になると、直線偏光のビームにより物体がアライメントされる現象を見だし、この現象が入射直線偏光ビームが物体を透過した際に変化する光の角運動量に起因することを明らかにした（図2(a)）。入射光電場の振動面と物体の低速軸または高速軸が一致するようにアライメントされ、どちらの軸と一致するかは物体のリタデーションに依存することを明らかにした。直線偏光ビームの偏光方向制御により任意位置への角度位置決めを実現した。マイクロレンズ、マイクロプリズムを作製し、マイクロ光部品アライメントへの応用の可能性を示した（図2(b)）。さらに、この光トラップした複屈折率微小物体をねじりばね型の新しい微小力検出手段として応用することを提案した。

第5章では光トラップした微小球を利用した微小変位、微小力検出について述べた。微小球の変位を高感度に測定するために臨界角法を適用した（図3）。透明、金属微小球の光軸および光軸に垂直方向の変

位計測を実証した。特に、金属微小球の光軸垂直方向の変位は従来のフラットなミラーの光軸方向の変位よりも高感度な計測が可能であった。そこで本技術を光トラップした金属微小球に適用し、微小力検出を試みた。光軸に垂直方向の光トラップばね定数は 10^{-6} N/m オーダと見積もられ、このばねを用いることにより 10^{-13} Nの微小力検出が可能であった。これは従来のAFMなどの走査型力顕微鏡に比べて、3～5桁小さい力でありきわめて微小な力検出が可能であることを示した。

第6章では、光マニピュレーションシステムを小型化するために、小型な変位センサの開発について述べた。測定物体からの反射光の変位・偏向を検出する三角測量・光でこ法に基づく集積型マイクロ変位センサを開発した。本センサ（図4）はGaAs基板上に形成したエッチドミラー半導体レーザ(LD)、ポリイミド光導波路、分割ディテクタ（二つのフォトダイオード(PD)）からなる（センササイズ：750 × 800 μ m）。本センサを用いて光トラップ適用寸法にある直径125 μ mの円筒物体の変位計測を実証した。

第7章は総括である。本研究ではマイクロマシニング技術を用いて光マニピュレーション技術进行操作性、制御性の高い技術に発展させた。将来、マイクロマシン分野での新しい駆動源としてその新しい応用が期待される。さらにマイクロ光部品の光駆動により光スイッチなどの光波制御を行うことなども可能になると考えられる。光による情報とエネルギーの伝達、計測、制御、操作、駆動などが一体となった高機能性光マイクロマシンへの発展が期待される。

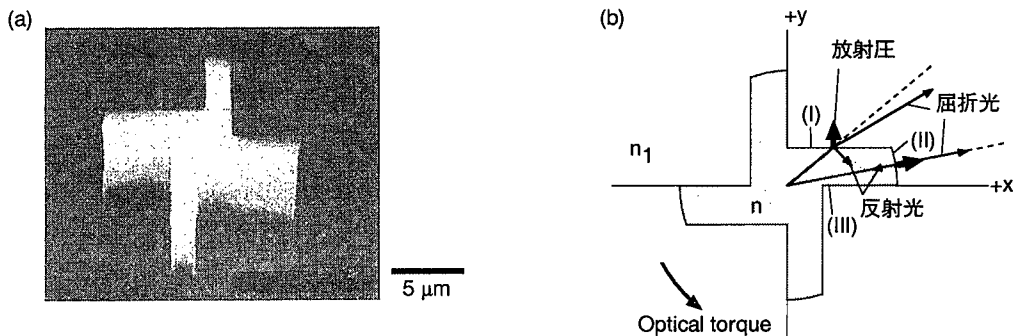


図1 光放射圧による微小物体の回転駆動、(a)走査電子顕微鏡写真、(b)回転原理図

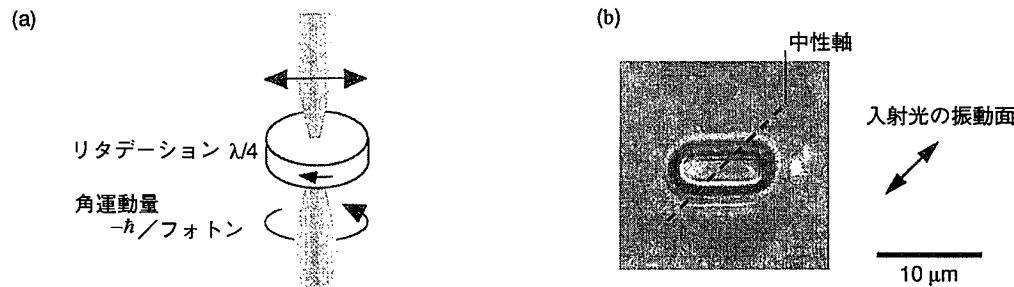


図2 光の角運動量による角度アライメント(a)角運動量の変化、(b)アライメントの様子

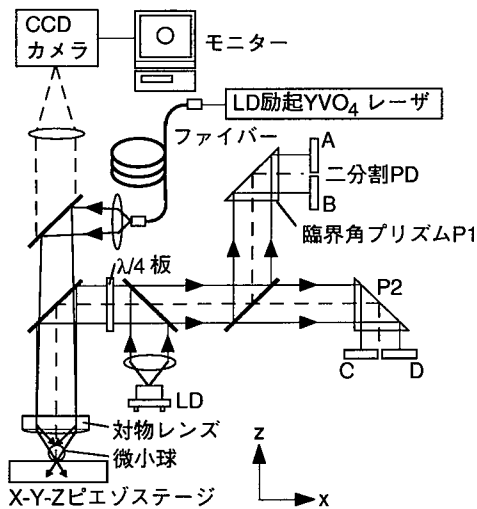


図3 光トラップした微小球の変位計測システム

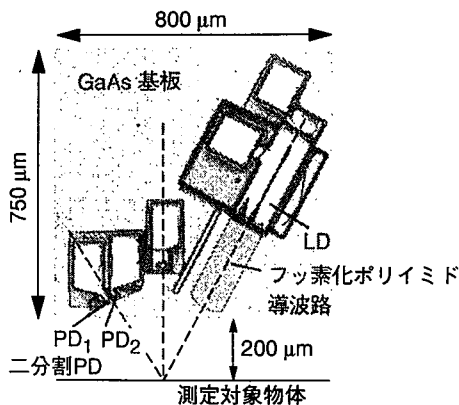


図4 三角測量法に基づく集積型マイクロ変位センサ

審査結果の要旨

光マニピュレーション技術は、非接触で微小物体を保持する光ピンセットとして生物学や医学、化学などの分野で利用され始めているが、適用可能な対象が限られ、制御性はまだ低い。本論文は、光マニピュレーション技術の機能を高め、精度を向上するため、回転駆動、角度制御、変位測定等に関する新手法の研究を行い、結果をまとめたもので、全編 7 章からなる。

第 1 章は序論である。本論文の背景、目的および構成について述べている。

第 2 章では、光放射圧の理論について概説するとともに、光放射圧を効率よく発生する方法として、物体に適切な形を付与する方法を提案した。特に物体をリング状に加工することで、低屈折率物体であっても光トラッピングが可能であることを示した。これは重要な知見である。

第 3 章では、物体に適切な形を付与することで光放射圧による回転駆動が実現できることを示した。断面形状を回転対称で鏡面对称でない形に加工することにより、光放射圧の一部をトルクに変換できることを示し、効率の高い回転駆動を実現した。これは重要な成果である。

第 4 章では、光トラップした微小物体の角度を光の角運動量の利用によって制御する方法を提案し、実験によりその有効性を示した。高複屈折率物体では、直線偏光のレーザーにより特定の角度に物体が固定できることを見だし、この現象が光の角運動量変化に起因することを明らかにした。この知見もまた重要である。

第 5 章では、光トラップした微小物体の変位および微小物体に作用している力の検出方法について述べている。臨界角法を適用することで、高感度な変位計測を実現した。さらに、光トラップのばね力を利用して 10^{-13} N の微小力検出が可能であることを実証した。これは重要な成果である。

第 6 章では、光マニピュレーションシステムを小型化するために、変位センサを開発した結果について述べている。半導体微細加工技術により集積型マイクロ変位センサを開発できたことは、工学上高く評価できる。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、光マニピュレーション手法を操作性、制御性の高い技術に発展させたもので、精密工学および光応用工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。